

具有二次型性能指标的简单自适应控制算法及其应用*

尹怡欣 孙一康 舒迪前
(北京科技大学信息工程学院 100083)

摘要 在简单自适应控制算法结构中引入二次型性能指标,使控制律计算简单且可用于具有一定非线性的被控对象,并给出了控制算法参数选择的一般性原则。对双输入双输出电加热炉进行实时控制,取得了满意的结果。

关键词 二次型性能指标,简单自适应控制,电加热炉,实时控制
分类号 TP 11

Simple Adaptive Control Algorithm with Quadratic Performance and Its Application

Yin Yixin, Sun Yikang, Shu Diqian
(University of Science and Technology of Beijing)

Abstract By minimizing the quadratic performance index, a simple adaptive control algorithm is obtained. The algorithm can be used to control the nonlinear plant. The rules of selecting the parameters of the algorithm are given. The result in electric heating furnace temperature controlling is satisfied.

Key words quadratic performance index, simple adaptive control, electric heating furnace, real-time control

1 引言

简单自适应控制(SAC)是一种对理想参考模型性能进行跟踪且结构简单的控制算法^[1,2]。基于PI适应律的简单自适应控制算法存在对被控对象要求过严和控制律计算困难等缺陷。为此,本文将二次型性能指标用于控制算法参数自适应律的计算,不仅保持了控制算法结构简单的特点,而且使控制律计算容易,适用于具有一定非线性的被控对象,并能适应被控对象的环境变化。根据控制参数选择的原则优选参数,可获得良好的控制效果。

2 控制算法

简单自适应控制的结构如图 1 所示。其设计思想是使被控对象跟踪事先设计好的理想参考模型的性能,并不要求被控对象与理想参考模型具有相同

的结构和参数,因此通常将理想参考模型设计成阶次较低的线性模型。控制增益是根据跟踪误差和参考模型的过程量,由一定的自适应律进行在线调节。

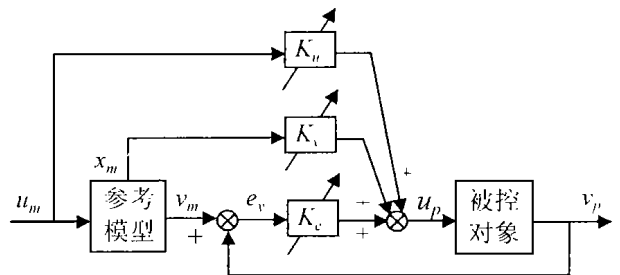


图 1 简单自适应控制的结构

设被控对象的输入输出模型描述为

$$A(z^{-1})y_p(k) = B(z^{-1})u_p(k-1) \quad (1)$$

其中, $y_p(k)$ 为 m 维输出向量, $u_p(k)$ 为 m 维控制输入向量; z^{-1} 为单位延迟算子,即 $z^{-1}y(k) = y(k-1)$; $A(z^{-1})$ 和 $B(z^{-1})$ 为 $m \times m$ 多项式矩阵,其形式为

* 1998 - 11 - 09 收稿, 1999 - 02 - 23 修回

$$A(z^{-1}) = I + A_1 z^{-1} + \dots + A_{n_a} z^{-n_a} \quad (2)$$

$$B(z^{-1}) = B_0 + B_1 z^{-1} + \dots + B_{n_b} z^{-n_b} \quad (3)$$

由于控制律的计算要用到参考模型的内部状态, 所以参考模型由如下状态方程和输出方程描述

$$x_m(k+1) = A_m x_m(k) + B_m u_m(k) \quad (4)$$

$$y_m(k) = C_m x_m(k) + D_m u_m(k) \quad (5)$$

其中, x_m 为 n_m 维参考模型状态向量, y_m 为 m 维参考模型输出向量, u_m 为 m 维参考输入向量; A_m, B_m, C_m 和 D_m 为具有相应维数的定常矩阵。

定义输出跟踪误差为

$$e_y(k) = y_m(k) - y_p(k) \quad (6)$$

控制目的是使被控对象输出跟踪参考模型的输出, 即

$$\lim_k e_y(k) = 0 \quad (7)$$

控制律的计算式为

$$u_p(k) = K_e(k)e_y(k) + K_x(k)x_m(k) + K_u(k)u_m(k) = K(k)r(k) \quad (8)$$

其中

$$K(k) = [K_e(k) \quad K_x(k) \quad K_u(k)] \quad (9)$$

$$r^T(k) = [e_y^T(k) \quad x_m^T(k) \quad u_m^T(k)] \quad (10)$$

控制算法增益矩阵 $K(k)$ 是由自适应律调节的, 本文采用一种使二次型性能指标为最小的方法来确定 $K(k)$ 的自适应调节律。设二次型性能指标为

$$J = \frac{1}{2} [e_y^T(k+1)P e_y(k+1) + \Delta u_p^T(k)Q \Delta u_p(k)] \quad (11)$$

其中

$$\Delta u_p(k) = u_p(k) - u_p(k-1) \quad (12)$$

$P = P^T > 0$ 和 $Q = Q^T > 0$ 分别为跟踪误差和控制增量的加权矩阵。通过使(11)式的性能指标取最小来确定控制参数的自适应律, 可在实现对参考模型跟踪的同时又不使控制增量过大。

控制算法增益矩阵 $K(k)$ 的自适应律由下式计算。

$$K(k+1) = K(k) - \frac{\eta Q}{K(k)} [K(k) - \eta Q \Delta u_p(k) r^T(k) - B_0^T P e_y(k+1) r^T(k)] \quad (13)$$

式中 B_0 为被控对象的静态增益阵, 通常可用实验手段获得, 而不必要求被控对象的其他参数。由于(13)式本身就是自适应调节律, 而且参数 P, Q 和 η 都必须事先选定, 所以实际控制时, 可将 $B_0^T P$ 合并为加

权矩阵 \bar{P} 直接加以选定。

应用Lyapunov稳定性分析方法和正实引理, 可证明误差方程和增益矩阵 $K(k)$ 是收敛的。

3 仿真研究

简单自适应控制算法与被控对象结构无关, 在此假设具有非线性单变量被控对象的近似数学模型为

$$y(k) = \frac{a_0(k)y(k-1) + u(k-1)}{1 + y^2(k-1)}$$

其中系数 $a_0(k)$ 是慢时变的, 即

$$a_0(k) = 1.5 + 0.15 \sin\left(\frac{k}{25}\pi\right)$$

选定参考模型为

$$A_m = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -0.08 & 0.6 \end{bmatrix}, \quad B_m = \begin{bmatrix} 0.685 \\ 0.205 \end{bmatrix}$$

$$C_m = [1 \quad 0]$$

自适应控制算法的参数为: $\eta = 0.3, \bar{P} = 0.5, Q = 0.2$; 控制增益初值 $K(0)$ 中各元素均选为零; 参考输入信号为幅值为 ± 1 的周期方波信号。

仿真结果如图2所示。被控对象输出 $y_p(k)$ 较好地跟踪了参考模型输出 $y_m(k)$, 且自适应控制增益 $K(k)$ 收敛。由于自适应控制增益的初值 $K(0)$ 均随意选定为零, 故在实际控制时, 可先通过仿真或对实际被控对象控制一段时间后, 将取得的 $K(k)$ 的稳定值作为实际控制的自适应控制增益的初值。

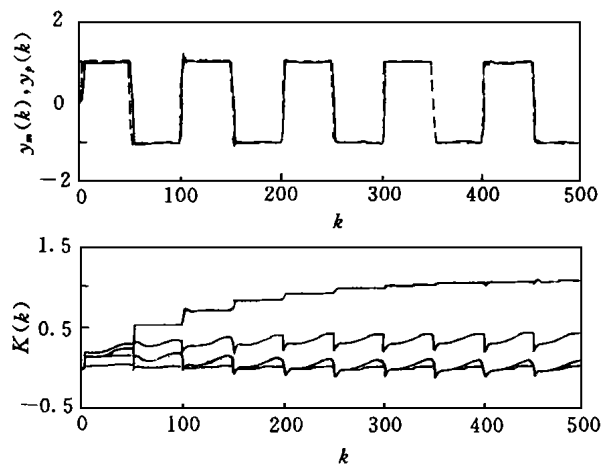


图2 被控对象具有非线性时控制算法闭环仿真结果

控制算法的控制效果与控制参数矩阵 $K(k)$ 的自适应律中加权矩阵 P, Q, η 及 $K(0)$ 的选取有很大关系。通过大量仿真和实控研究, 控制参数的选取可根据以下原则进行:

1) 初始 $K(0)$ 几乎可以任意选取,但在有条件时最好通过仿真或实验选取更好的初值,以避免投控时性能低下;

2) η 值若选取过大,则调节剧烈,从而可能引发振荡,反之,则使过渡时间变长,控制反应迟缓;

3) 加权矩阵 P 的大小决定了输出跟踪误差在性能指标中所占的比重,对系统的稳定性有一定影响,可通过仿真和实验来确定;加权矩阵 Q 则是为了限制控制增量 $\Delta u_p(k)$ 的剧烈变化,不宜选得过大。

4 应用实例

采用本文提出的控制算法对一个双输入双输出电加热炉的温度实时控制,控制目标是使炉内温度均衡地稳定在 600°C , 采样周期选为 1min 。参考模型选为

$$A_m = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -0.2 & 0.8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -0.15 & 0.8 \end{bmatrix}$$

$$B_m = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 \\ 0.3 & 0 \\ 0 & 0.58 \\ 0 & 0.23 \end{bmatrix}$$

$$C_m = [1 \ 0 \ 1 \ 0]$$

自适应控制算法的参数为

$$\eta = 0.25$$

$$\bar{P} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.035 \\ 0.03 & 0.6 \end{bmatrix}, \quad Q = \begin{bmatrix} 0.3 & 0 \\ 0 & 0.2 \end{bmatrix}$$

控制增益初值为

$$K(0) = \begin{bmatrix} 0.3 & 0.0 & 0.1 & 0.1 & 0.0 & 0.0 & 0.5 & 0.0 \\ 0.0 & 0.3 & 0.0 & 0.0 & 0.1 & 0.1 & 0.0 & 0.5 \end{bmatrix}$$

图3为实控曲线,在稳定段的稳态跟踪误差小于 4°C , 结果令人满意。

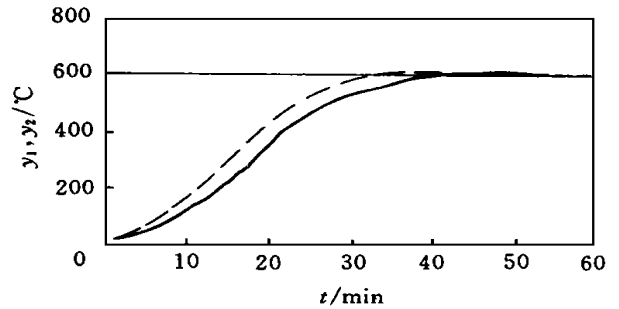


图3 实际温度控制曲线

参考文献

- 1 IBar Kana Absolute stability and robust discrete adaptive control of multivariable systems In: Control and Dynamic Systems New York: Academic Press, 1989
- 2 柴田 浩, 红林 毅 简易型适应控制に対する离散时间アルゴリズム, 计测自动制御学会论文集, 1995, 31(2): 177- 184
- 3 舒迪前, 奉川东, 尹怡欣 具有二次性能指标的单神经元自适应PD控制器及其应用 电气自动化, 1997, 19(1): 4 - 7

作者简介

尹怡欣 男, 1957年生。1982年毕业于北京钢铁学院自动化系, 现为北京科技大学信息工程学院教授。研究领域为自适应控制, 智能控制, 神经网络和工业过程计算机控制等。

孙一康 男, 1932年生。北京科技大学信息工程学院教授, 博士生导师。研究方向为轧钢过程自动化, 最优控制和分布式计算机控制系统等。

舒迪前 男, 1927年生。北京科技大学信息工程学院教授。研究领域为自适应控制, 预测控制, 智能控制和系统辨识等。

(上接第 235 页)

作者简介

郭刚 男, 1972年生。1997年在西北工业大学获硕士学位, 现为西北工业大学博士研究生。研究兴趣为非线性系统建模及预测, 模式识别, 智能控制, 智能决策等。

史忠科 男, 1956年生。西北工业大学教授, 博士生导师。

师。主要研究领域为随机控制, 智能控制, 系统辨识, 飞行力学等。

戴冠中 男, 1937年生。西北工业大学校长, 教授, 博士生导师。主要研究领域为大系统估计与控制理论, 智能控制, 控制系统中的并行处理理论、算法与并行计算机。